

УДК 621.396.967 : 621.391.822 : 537.3

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИНЕПРЕРЫВНЫХ РЕЖИМОВ СВЧ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ РЛС С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ОБЗОРОМ ПРОСТРАНСТВА

А.С. Фатеев

(Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков)

Приведены результаты экспериментального исследования процессов установления амплитуды и частоты колебаний вакуумных и твердотельных СВЧ генераторов в квазинепрерывных режимах работы, обусловленных переключениями питания приемопередающих СВЧ модулей РЛС непрерывного излучения.

СВЧ генератор, РЛС непрерывного излучения, квазинепрерывный режим

Введение. Обзор пространства для многофункциональных РЛС [1] является одной из важнейших задач, решение которой, в частности, может осуществляться за счет сканирования одним или несколькими лучами. Роль методов электрического дискретного сканирования значительно возросла в условиях непрерывного насыщения РЛС вычислительной техникой, роста требований к скорости перемещения диаграммы направленности антенны. Основой создания таких сканирующих систем стали применение активных антенных решеток (АР) и разработка соответствующих СВЧ элементов. Данные исследования проведены применительно к одной из разновидностей АР – многолучевой, образованной разнонаправленными приемопередающими СВЧ модулями [2, 3]. В состав каждого однотипного СВЧ модуля, кроме приемных и передающих антенн, могут входить СВЧ узлы приемопередающего тракта, преобразователи и устройства согласования с общими низкочастотными устройствами РЛС. Взаимное пространственное расположение диаграмм направленности модулей и электрическое управление их включением должно обеспечивать необходимый алгоритм последовательного обзора пространства одним лучом. За счет кратковременного последовательного включения лучей АР и соответствующей обработки в одной приемной системе обеспечивается пространственная многоканальность РЛС в целом – независимое квазиодновременное прохождение информации от множества пространственно разнесенных источников [1]. Электрический обзор пространства многолучевой АР может быть реализован двумя способами:

– использовать СВЧ коммутирующие устройства для подключения общих передающего и приемного устройств к соответствующим антеннам различных секторов обзора;

– поочередно включать независимые активные СВЧ модули, а выходы включенного модуля подключать к единому приемному каналу.

Анализ публикаций. Результаты исследования различных типов коммутирующих СВЧ устройств, в том числе миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, достаточно полно рассмотрены в литературе [4, 5]. Однако с повышением несущей частоты РЛС и увеличением числа коммутируемых каналов применение СВЧ переключателей становится нецелесообразным из-за недопустимого увеличения потерь пропускания и усложнения схемы СВЧ тракта. В последнее время в микроволновой твердотельной электронике получила развитие концепция создания генераторно-излучающих малогабаритных твердотельных модулей, потенциальные возможности которых обеспечивают преимущества предлагаемого электрического обзора пространства [6].

Во всех известных работах [6 – 9] отсутствуют сведения о возможности обеспечения одним СВЧ генератором непрерывного излучения или включения импульсами с длительностями в единицы и десятки миллисекунд. Поэтому, возникла актуальная необходимость исследования различных типов СВЧ генераторов и сравнения их характеристик в режимах непрерывных и квазинепрерывных колебаний.

Цель работы. Исследовать процессы установления амплитуды и частоты СВЧ колебаний различных СВЧ генераторов в квазинепрерывных режимах, оценить влияние этих режимов на работоспособность РЛС непрерывного излучения при дискретном обзоре пространства.

Исследования и результаты. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования СВЧ генераторов длинноволновой части миллиметрового диапазона волн применительно к РЛС с непрерывным излучением и последовательным обзором пространства, который обеспечивается поочередным включением питания СВЧ генераторов в модулях многолучевой АР. Исследованные длительности включения СВЧ генераторов от единиц до десятков миллисекунд при скважности более 2 исходят из значений возможного периода обзора пространства и количества лучей АР.

При совмещении непрерывного и квазинепрерывного режимов работы всех типов СВЧ генераторов важным общим требованием является стабильность выходного напряжения и постоянство тока нагрузки переключаемого источника питания, что достигается включением только одного из имеющихся СВЧ генераторов. Схемы управления и переключения должны обеспечивать изменение длительности включения СВЧ генераторов, а также высокочастотную (ВЧ) модуляцию по напряжению (току). В цепях переключения нельзя ставить резонансные цепи, конденсаторы большой емкости, чтобы

исключить переходные процессы в них. Разделение функций стабилизации (источником постоянного напряжения или тока) и переключения (модулятором) позволяет унифицировать блок модулятора и обеспечивать им переключение и ВЧ модуляцию различных типов СВЧ приборов. Оптимальный режим определенного типа СВЧ генератора достигается соответствующим изменением выходного напряжения (тока) стабилизированного источника. Обобщенная функциональная схема переключения питания нескольких СВЧ генераторов показана на рис. 1 (выводы СВЧ колебаний не показаны).

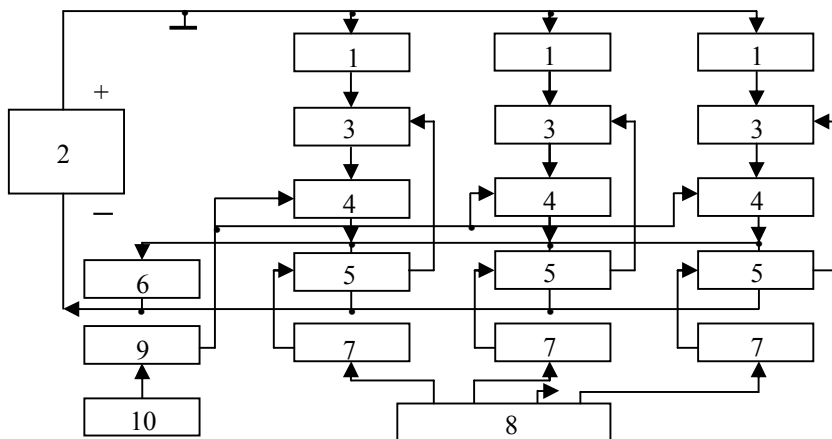


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема переключения питания нескольких СВЧ генераторов:

1 – СВЧ генераторы; 2 – источник стабилизированного напряжения (тока); 3 – переключающие элементы; 4 – стабилизаторы режима работающего генератора; 5 – схемы управления переключающим элементом; 6 – общая нагрузка смещения; 7 – оптронные пары гальванической развязки цепей переключения от схемы логического управления; 8 – схема логического управления; 9 – трансформатор разделительный по модулирующему ВЧ сигналу; 10 – генератор модулирующего ВЧ сигнала

Цепь переключения питания каждого СВЧ генератора 1 содержит последовательно соединенные переключающий элемент 3, стабилизатор режима работающего генератора 4 и схему управления 5, обеспечивающую ключевой режим работы элемента 3. Стабилизаторами режима 4 выравниваются рабочие токи и осуществляется заданная модуляция СВЧ колебаний генераторов 1. Общая нагрузка 6 за счет постоянного протекания тока одного из генераторов 1 обеспечивает стабильное напряжение питания схем управления 5, достаточное для запирающих переключающих элементов по другим генераторам. Схема логического управления 8 через оп-

тронные пары 7 гальванической развязки позволяет одновременно включать только один из СВЧ генераторов, что обеспечивает постоянство нагрузки источника стабилизированного напряжения или тока 2.

Исследование процессов установления амплитуды и частоты колебаний СВЧ генераторов непрерывного действия в квазинепрерывных режимах проводилось на установке, функциональная схема которой приведена на рис. 2. Изменением частоты генератора 2, работающего в режиме меандра, устанавливалась длительность импульса включения исследуемого СВЧ генератора $\Delta T = 1 - 50$ мс, часть сигнала которого подавалась на анализатор спектра 12, а также на устройства 6 – 11 для анализа временных процессов установления амплитуды и частоты СВЧ колебаний. Использование режима долговременной памяти анализатора С4-60 (более 100 с) позволило поочередно регистрировать на экране спектры сигналов СВЧ генераторов как при непрерывном, так и в импульсном режиме работы.

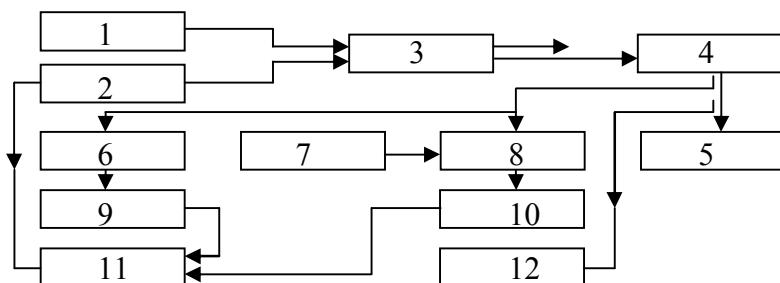


Рис. 2. Функциональная схема:

1 – общий источник питания; 2 – ГНЧ; 3 – переключатель питания СВЧ генераторов; 4 – генератор СВЧ; 5 – поглощающая нагрузка; 6 – волномер; 7 – перестраиваемый гетеродин; 8 – СВЧ смеситель; 9 – детекторная секция; 10 – УПЧ; 11 – двухканальный осциллограф С1-79; 12 – анализатор спектра С4-60

Основной объем исследования процессов установления амплитуды и частоты СВЧ колебаний в импульсных режимах для непрерывных вакуумных генераторов проведен на измерительном стенде (рис. 2) с автогенераторным пролетным клистроном; магнетронный генератор проверялся в составе РЛС, работающей в квазинепрерывных режимах обзора пространства. Момент возникновения СВЧ колебаний клистрона определяется частью фронта модулирующего импульса, соответствующей диапазону рабочих напряжений, а время возникновения СВЧ колебаний не превышает 1 мкс. В момент включения клистрона спектральная плотность колебаний больше чем в непрерывном режиме и уменьшается по мере увеличения времени существования

сигнала. Подобное увеличение мощности в импульсном режиме наблюдалось и при работе с магнетроном. Этот эффект можно объяснить накоплением за время выключения и рассасыванием за время импульса электронного облака в пространстве взаимодействия, что подтверждается сильной зависимостью эффекта от значения рабочего тока клистрона (не наблюдается при малых рабочих токах). За время импульса $\Delta T = 50$ мс частота колебаний клистрона нелинейно снижается и стремится к установившемуся значению частоты в непрерывном режиме, а скорость изменения частоты СВЧ колебаний уменьшается от 3 до 0,5 МГц/мс. На рис. 3 представлены спектрограммы сигналов клистрона при непрерывном (слева – точка А) и импульсном (справа – зона Б, соответствующая ΔF) режимах работы, зарегистрированные анализатором спектра С4-60. Его рабочие параметры в режиме последовательного анализа определяются соотношениями для «активной» полосы частотного спектра, предложенными Д.В. Агеевым для анализа широкополосной ЧМ [10].

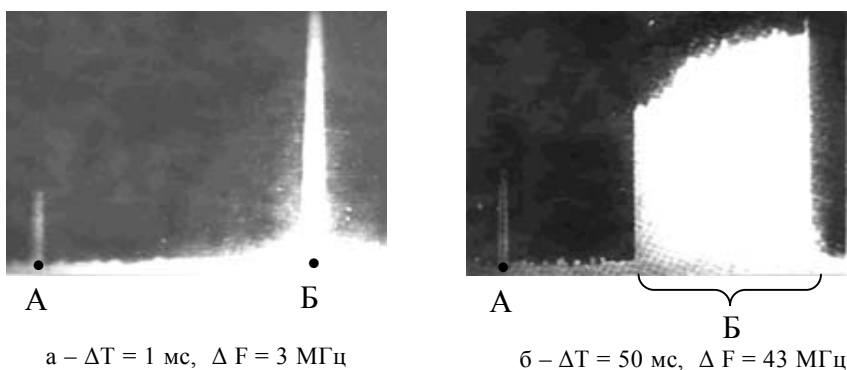


Рис. 3. Спектры сигналов клистрона

Выбранная полоса выходного фильтра 300 кГц соответствовала скорости изменения частоты в импульсе и ширине «активного» спектра, все гармонические составляющие воспроизводились фильтром одновременно и независимо, с допустимой погрешностью отражая анализируемый сигнал. Так как «активная» полоса непрерывно «сопровождает» мгновенную частоту сигнала, то спектрограмма, снятая в импульсном режиме соответствует девиации частоты в течение импульса, а частотное удаление от спектра сигнала в непрерывном режиме – различию частот СВЧ колебаний в этих двух режимах. В импульсном режиме верхние спектральные составляющие были на 60 МГц выше установившегося значения частоты в непрерывном режиме, а изменение частоты ΔF в импульсе увеличивалось от 3 до 43 МГц при увеличении длительности импульса ΔT от 1 до 50 мс. Время установления частоты и амплитуды колебаний непрерывного

режима генерации примерно равны между собой и составляют 150 – 200 мс, что оценено путем аппроксимации дальнейшего хода зависимостей.

В качестве твердотельных СВЧ генераторов исследовались генератор Ганна (ГДГ) на диоде 3А 728А и генератор на ЛПД 2А717-4, размещенные в волноводно–коаксиальной конструкции с нагруженной добротностью $Q_n = 100$, кроме того для ГДГ проведены измерения с дополнительным стабилизирующим резонатором с нагруженной добротностью $Q_c = 2000$, который подключался по схеме «на отражение».

Длительность и вид переходных процессов при установлении амплитуды СВЧ колебаний в ГДГ и ГЛПД значительно отличаются между собой. Так при добротности резонатора $Q_n = 100$ в ГЛПД длительность установления амплитуды СВЧ колебаний до уровня $0,7 - t_y$ составляла менее 2 мкс, что соответствовало интервалу стабилизации тока через ЛПД. Для ГДГ при тех же условиях $t_y = 30$ мкс, причем, примерно через 10 мкс с момента начала регистрации СВЧ колебаний детекторной секцией происходит амплитудная модуляция СВЧ колебаний частотой 600 – 700 кГц в течение 10 – 15 мкс, это показано на рис. 4.

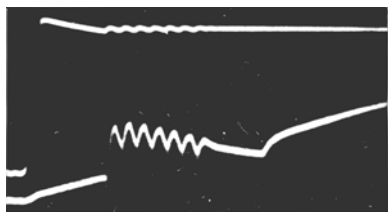


Рис. 4. Осциллограмма импульса напряжения питания ГДГ (вверху) и сигнала на выходе детекторной секции (внизу)

При использовании в ГДГ стабилизирующего резонатора с нагруженной добротностью $Q_c = 2000$ амплитудная модуляция имеет такой же вид, но большую глубину модуляции, а t_y увеличивается до 60 мкс; установление СВЧ колебаний носит скачкообразный характер, имеет разброс по времени до

15 мкс от импульса к импульсу, что обусловлено процессом захвата частоты генератора, так как разброс зависит от перестройки стабилизирующего резонатора. После установления СВЧ колебаний их амплитуда в обоих типах генераторов изменяется незначительно.

Спектры сигналов ГДГ в непрерывном (слева – А) и квазинепрерывном (справа – Б) режимах при использовании высокодобротного резонатора представлены на рис. 5. Видимость увеличения амплитуды СВЧ колебаний по мере приближения частоты в импульсе к значению частоты непрерывного режима объясняется снижением скорости изменения частоты и инерционностью выходного фильтра анализатора спектра С4-60. Верхние спектральные составляющие сигнала ГДГ в импульсе были на 55 МГц выше установившегося значения частоты в непрерывном режиме, а девиация частоты за время импульса ΔF увеличивалась от 35 до 45 МГц при изменении ΔT от 5 до 50 мс. При отсутствии

стабилизирующего резонатора верхние спектральные составляющие импульсного сигнала удалены от установившегося значения частоты непрерывного сигнала на 160 МГц, девиация частоты в течение импульса длительностью 50 мс составляет 80 МГц. Таким образом, при использовании стабилизирующего резонатора в ГДГ различие частот непрерывного и импульсного режимов уменьшалось примерно в три раза.

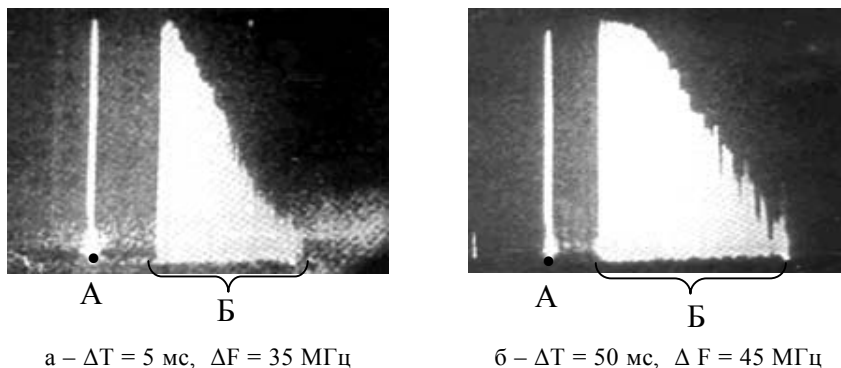


Рис. 5. Спектры сигналов ГДГ с $Q_c = 2000$

Спектры сигналов ГЛПД имеют вид подобный спектрам ГДГ, но значительное изменение частоты в начале импульса (табл. 1) и малое отличие частоты в конце импульса от значения частоты непрерывного режима приводит к большим искажениям при регистрации спектра. Это потребовало проведения с помощью волномера измерения частот генератора в различные моменты после включения и сравнения этих зависимостей с результатами подобных измерений для других генераторов.

Таблица 1

Скорость изменения частоты в импульсе (кГц/мкс)

Тип прибора	Интервал измерения, мс			
	0 – 0,01	0,2 – 0,5	0,5 – 5	5 – 50
Клистрон	–	–	< 3	0,5
ГДГ	–	–	< 4	0,4
ГЛПД	$20 \cdot 10^3$	83	< 1	< 0,2

Сравнение значений скорости изменения частоты СВЧ колебаний в различные интервалы после импульсного включения для всех исследованных типов СВЧ генераторов приведено в таблице. Из таблицы следует, что при длительностях импульсов 5 – 50 мс обеспечивается «когерентный» режим РЛС ближнего действия, так как изменение частоты СВЧ генератора за 1 мкс сравнимо с шириной спектра сигналов от движущихся объектов.

Наиболее полная информация о процессах установления частоты колебаний исследованных типов СВЧ генераторов при отсутствии дополнительных стабилизирующих резонаторов представлена на рис. 6, откуда видно, что в ГЛПД частота непрерывных колебаний устанавливается за время меньше 5 мс. Для ГЛПД характерно значительное отличие частот СВЧ колебаний (более 1%) непрерывного и импульсного режимов, но это отличие велико только для коротких импульсов (начала импульса) – до 10 мкс. Это обстоятельство осложняет применение стабилизирующего высокочастотного резонатора при квазинепрерывных режимах ГЛПД.

Сравнение спектров клистрона (рис. 3) и ГДГ (рис. 5) для малых (а) и больших (б) длительностей включения показывает, что при длительностях импульса 50 мс спектр расширяется не только вниз (к значению частоты непрерывного режима), но и вверх. Это можно объяснить различием интервалов выключения, так как в измерительном стенде модуляция генераторов производилась меандром. В будущих исследованиях следует уточнить этот вопрос путем использования импульсов с изменяемой скважностью, кроме этого предстоит дополнительно исследовать возможность увеличения амплитуды питающих напряжений (токов) в импульсных режимах, а также уменьшения длительности переходных процессов установления амплитуды СВЧ колебаний в ГДГ.

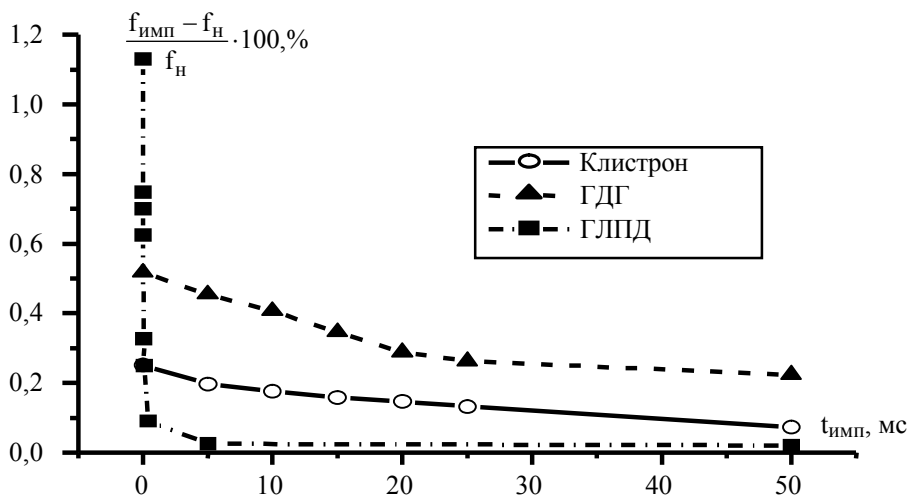


Рис. 6. Изменение частоты колебаний СВЧ генераторов за время импульса, нормированное относительно частоты колебаний непрерывного режима

Приведенные выше результаты для длительностей импульсов твердотельных СВЧ генераторов $\Delta T = 5 - 50$ мс согласуются с данными по исследованию ГЛПД в режиме импульсов с длительностями до 5 мкс [7, 8]

и подтверждают вывод о том, что процесс установления частоты колебаний твердотельных СВЧ генераторов определяется переходными тепловыми процессами в кристалле диода.

Квазинепрерывные режимы РЛС непрерывного излучения были реализованы в системе ближнего действия и экспериментально проверены в натурных условиях по реальным движущимся объектам и их электронным имитаторам. Измерительный интервал выходных цифровых преобразователей приемника был задержан относительно начала импульса включения СВЧ генераторов на 1,5 мс, что позволило исключить влияние на систему переходных процессов, происходящих в передатчике и в выходных каскадах приемника в моменты переключения. При измерениях дальности до имитатора движущегося объекта в РЛС с магнетронным генератором обнаружено постоянное систематическое отличие результатов для непрерывного и импульсного режимов, что обусловлено различием частот в этих режимах. Как показал дальнейший анализ использовавшейся РЛС с частотной модуляцией по гармоническому закону и фазовым методом измерения дальности и угловых координат [10], различие частот зондирующего сигнала в режимах импульсного и непрерывного излучения, а также изменение частоты в импульсе не влияют на результаты измерения координат реальных целей.

Выводы. Исследование квазинепрерывных режимов различных типов СВЧ генераторов позволило обнаружить следующие особенности:

1. В режимах генерации с длительностью импульсов > 5 мс частота возникающих колебаний значительно превышает установившееся значение частоты непрерывного режима и нелинейно снижается к нему по мере увеличения длительности включения СВЧ генератора.

2. Процессами установления амплитуды СВЧ колебаний и изменения частоты колебаний в импульсе можно управлять за счет использования стабилизирующего резонатора, изменения его частоты настройки, добротности и связи с генерирующей камерой.

3. Длительности переходных процессов установления амплитуды СВЧ колебаний и максимального изменения частоты могут исключаться из обработки без существенной потери мощности СВЧ сигнала и нарушения работоспособности квазинепрерывных РЛС ближнего действия.

4. При использовании вакуумных СВЧ генераторов непрерывного действия с постоянно включенным накалом в квазинепрерывных режимах наблюдается увеличение мощности генерируемых импульсных сигналов.

5. Исходя из длительности процессов установления амплитуды и частоты колебаний, наиболее предпочтительным для использования в квазинепрерывных режимах являются ГЛПД.

Экспериментальные исследования квазинепрерывных режимов СВЧ генераторов в составе локационной системы ближнего действия подтверди-

ли возможность создания РЛС непрерывного излучения с квазиодновременным электрическим обзором пространства путем включения питания СВЧ генераторов, каждый из которых обслуживает свой сектор обзора.

Отдельные результаты исследования квазинепрерывных режимов СВЧ генераторов доложены автором на конференции «КрыМиКо-2003»[11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишов Ю.А., Ворошилов В.А. Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов. – М.: Радио и связь, 1987. – 144 с.
2. ГОСТ 23282-91. Решетки антенные. Термины и определения. – Введ. 01.01.92. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 9 с.
3. Вапнэ Г.М. Антенны с электрическим сканированием для многофункциональных РЛС (зарубежное обозрение) // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электронная техника. – 1982. – Вып. 5 (874).
4. Петров А.С. Многоканальные коммутационные устройства // Успехи современной радиоэлектроники. – 1997. – № 9. – С. 48 – 64.
5. Карушкин Н.Ф. Полупроводниковые устройства миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн для модуляции и переключения СВЧ мощности // Радиоэлектроника. – 2000. – № 8. – С. 26 – 34. (Изв. высш. учебн. заведений).
6. Правда В.И., Борисенко А.А., Яременко В.А. Состояние и перспективы применения генераторно-излучающих модулей в активных ФАР. (Обзор) // Радиоэлектроника. – 1993. – № 2. – С. 3 – 15.
7. Карушкин Н.Ф. Источники мощности миллиметрового диапазона на лавинно-пролетных диодах с распределенными параметрами // Радиоэлектроника. – 1999. – № 7. – С. 47 – 54. (Изв. высш. учебн. заведений).
8. Зубов С.В., Обрезан О.И. Исследование импульсного режима ГЛПД // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – Вып. 5 (365). – 1984. – С. 41 – 43.
9. Кукарин С.В. Электронные приборы СВЧ: Характеристики, применение, тенденции развития. – 2изд., перераб. доп. – М.: Радио и связь, 1981. – 272 с.
10. Винницкий А.С. Модулированные фильтры и следящий прием ЧМ сигналов. – М.: Советское радио, 1969. – 548 с.
11. Скольник М. Введение в технику радиолокационных систем: Пер. с англ. / Под ред. К.Н. Трофимова. – М.: Мир, 1965. – 747 с.
12. Фатеев А.С., Архипов А.В., Силин А.О. Экспериментальное исследование СВЧ генераторов в квазинепрерывных режимах работы // Доклады 13-й Международной Крымской конференции КрыМиКо'2003 «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь. – 2003. – С. 296 – 298.

Поступила 13.03.2005

Рецензент: доктор физико-математических наук ст. научный сотрудник В.К. Иванов, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков.